

Poluvodički integrirani krugovi

dr ZVONIMIR OGORELEC, Zagreb

Ovaj tekst posljednji je iz serije od tri članka namijenjenih poluvodičima i njihovoj tehnologiji. Dok je prvi bio posvećen osnovama fizike poluvodiča, a drugi se bavio »diskretnim« elektroničkim komponentama, ovaj treći članak opisat će najmodernije dostignuće poluvodičke tehnologije — monolitne integrirane krugove. Pod tim nazivom kriju se minijturni sklopovi različite namjene, čije su komponente izrađuju posebnim postupkom sve odjednom, istovremeno, na jednoj jedinnoj pločici silicija. Odjednom se, dakle, izrađuje čitav sklop. Takvi »mikrokrugovi« ili »čipovi« (to su još neki od njihovih naziva) osvajaju nepovratno današnju elektroniku te istiskuju iz nje gotovo sve čime se ona nekad ponosila. Naravno, preko elektronike oni prodiru i u mnoge pore našeg svakodnevnog življenja. Dobrom uvidu u to kako su oni nastali, kako su se razvijali i kako se danas izrađuju mnogo će pomoći ova

1. Kratka kronologija

Nakon 1948. godine elektronika je raspolagala s dva već dosta usavršena poluvodička elementa. Bile su to, dakako, »diskretne« komponente: poluvodička dioda i tranzistor. One su skoro u potpunosti mogle zamijeniti vakuumске cijevi, diodu i triodu, a krasile su ih i tri odlike kojima su se stručnjaci naročito oduševljavali. Na prvom mjestu valja spomenuti male dimenzije. Po najskromnijoj procjeni, uzevši u obzir i minijturne vakuumске cijevi, volumen poluvodičke diode bio je barem dvadeset puta manji od volumena cijevi. Drugo važno svojstvo bio je nulti pasivni utrošak energije. Dok su cijevi zahtijevale posebne izvore struje za zagrijavanje svojih žarnih niti, poluvodičkom priboru oni nisu bili potrebni. Na kraju, kad je usavršen *Shockleyev* tranzistor s plošnim *p-n* spojem, on se odlikovao vrlo visokom pouzdanošću

Na žalost, ali posve razumljivo, važnost tih triju svojstava uvidjeli su ponajprije vojni stručnjaci. Drugi svjetski rat naučio ih je da uporabivost i efikasnost raznih vrsta oružja sve više zavisi od, kako se to nelijepo kaže — »ugradene elektronike«. Ta »elektronika« su uređaji za detekciju, za komunikaciju i kontrolu. Budući da se završetkom drugog svjetskog rata, 1945. godine, nije ujedno okončala i povijest ljudskog ratovanja, zahtjev za konstrukcijom sve složenijih, ali i manjih, po utrošku energije sve skromnijih i sve pouzdanijih uređaja nije jenjavao. Složenost uređaja bila je od posebne važnosti. Naime, što složeniju zadaću mora neki uređaj obaviti, to on mora biti kompleksniji, mora imati više elektroničkih komponenti, više cijevi ili tranzistora te više otpornika, kondenzatora i ostalih parafernalija. Dok se, s jedne strane, jednostavni radioaparat dade izgraditi s jednom jedinom cijevi i svega nekoliko dodatnih komponenti, prvi računski stroj ENIAC morao je imati čak 18000 cijevi. Taj mamutski uređaj, izgrađen prije pronalaska tranzistora (1946. godine) na Moore School of Electrical Engineering na Pennsylvanijskom sveučilištu, zapremao je dvije velike prostorije, težio 30 tona, trošio velike količine energije i vrlo se često — kvario.

Naročito smo naglasili da se on često kvario, jer ta nam činjenica ilustrira neobično važan pojam pouzdanosti elektroničkih uređaja. Pouzdanost je, zasigurno, jedna od pokretačkih sila razvoja nove, poluvodičke tehnologije. O čemu se zapravo radi? Radi se o očiglednoj činjenici da nijedna elektronička komponenta nije vječna. Uvijek postoji vjerojatnost da ona u određenom vremenu zataji, pokvari se. Izgaraju žarne niti elektroni, prskaju njihova podnožja, probijaju kondenzatori ili se prekidaju lemljeni spojevi. Unatoč svim — za vojne svrhe, na primjer — vrlo rigoroznim kontrolama pojedinačnih dijelova, poluproizvoda i gotovih uređaja, oni se ipak kvare. Vjerojatnost kvara utvrđuje se testiranjem vrlo velikog broja uzoraka, a može se najjednostavnije izraziti pomoću tzv. srednjeg vremena između kvarova (SVIK). Očito je da to vrijeme za pojedinu komponentu znači vrijeme njezina života, a za neki uređaj vrijeme koje protekne između dva popravka. Evo sada nekoliko brojki za ilustraciju:

Komponenta	SVIK u satima
Cijev	200 000
Kondenzator	20 000 000
Otpornik	100 000 000
Podnožje cijevi	200 000 000
Lemljeni spoj	500 000 000

Ove brojke zaista su velike i daju dojam da komponente traju praktički vječno. Tako i jest, no to nema nikakvog značenja, jer pojedina komponenta nije sama sebi svrhom. Ona je ugrađena u neki uređaj, a tu se situacija drastično mijenja. Upitamo li se, dakle, koliki je SVIK nekog uređaja, morat ćemo se najprije upitati od koliko se komponenti sastoji. Uzet ćemo tri primjera: jednostavni

komunikacijski uređaj, neki kontrolni uređaj i (danas hipotetski) računski stroj. Ti uređaji sastoje se prosječno od ovog broja dijelova:

	<i>Komunikacijski uređaj</i>	<i>Kontrolni uređaj</i>	<i>Računski stroj</i>
Cijevi	10	200	20000
Kondenzatori	20	300	40000
Otpornici	40	1000	100000
Podnožja	10	200	20000
Spojevi	200	4000	400000

SVIK tih uređaja dade se vrlo lako izračunati iz SVIK-ova pojedinih komponenti. Zbrajaju se jednostavno recipročne vrijednosti, jer one predstavljaju srednje vjerojatnosti kvarova. Taj račun daje:

<i>Sistem</i>	<i>SVIK u satima</i>
Komunikacijski uređaj	19300
Kontrolni uređaj	965
Računski stroj	9,6

Vidi se, dakle, da bi računski stroj mogao ispravno raditi manje od deset sati, Spomenuti ENIAC zaista se tako ponašao.

Pojava tranzistora i poluvodičkih dioda naglo je izmijenila ove brojke, jer je pouzdanost tih novih komponenti narasla za gotovo dva reda veličine. Za njihov SVIK mogla se uzeti vrijednost od 10 000 000 sati. Kad bi se svaka cijev u uređajima iz naših primjera zamijenila tranzistorom ili diodom, dobili bi se ovi podaci:

<i>Sistem</i>	<i>SVIK u satima</i>
Komunikacijski uređaj	350800
Kontrolni uređaj	18520
Računski stroj	170

Napredak je očit i uvjerljiv pa mu ne treba posebnog komentara. Spomenimo ipak da to nije ni izdaleka današnji domet. Njega ćemo raspraviti malo kasnije.

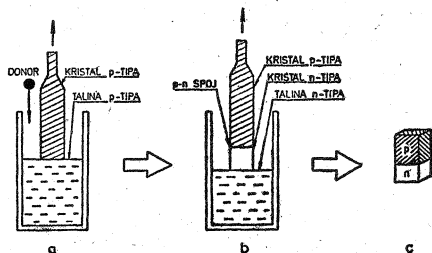
2. Minijaturizacija i »integriranje«

Pozabavimo se u međuvremenu napretkom koji je pojava tranzistora omogućila u minijaturizaciji uređaja. Elektronika je, zapravo, oduvijek nastojala graditi što manje uređaje, ali pritom nije htjela žrtvovati njihovu složenost. To nastojanje, kako smo rekli, naročito je pomagala vojna industrija. Kao mjera za veličinu i složenost nekog aparata obično se koristi tzv. gustoća pakovanja elektroničkih komponenti. To je broj koji pokazuje koliko je komponenti ugrađeno u neki uređaj po jedinici njegovog volumena, na primjer, po kubičnom centimetru. Tako je oko 1935. godine gustoća pakovanja iznosila $0,001 \text{ cm}^{-3}$. Do 1950. godine ona je rasla vrlo sporo i bez naglih promjena. Porast se mogao pripisati samo smanjivanju dimenzija pojedinih komponenti zbog pojave novih materijala ili zbog uznapredovale vještine izrade. Na primjer, neka trioda od kojih 100 cm^3 postepeno se pretvorila u »minijaturnu« triodu od svega 20 cm^3 . Tek su tranzistori i poluvodička dioda izazvali znatniji porast gustoće pakovanja. Ona se popela na vrijednost 3 cm^{-3} već 1955. godine kad su oduševljeni tehnolozi lansirali izraz »mikrokrugovi«. Danas se to čini pretjeranim, ali je za ono vrijeme takvo oduševljenje bilo ipak opravdano. Radilo se, naime, o skoku od nekoliko redova veličine.

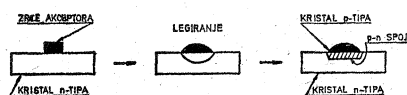
Tako visoke gustoće pakovanja dostignute su na dva načina: ili se nastojalo iz što manjih »diskretnih« komponenti izgraditi minijaturene sklopove usavršenom tehnikom povezivanja ili se koristilo »integriranje«. Budući da se taj izraz koristi i za današnje poluvodičke sklopove, naglasimo veliku razliku. Tada se pod integriranjem mislilo na izradu vodova, otpornika i kondenzatora nanošenjem filmova iz pogodnih materijala na keramičke supstrate. Aktivne komponente, tranzistori i diode, ugrađivale su se naknadno u mrežu tih pasivnih komponenti. Ova tehnologija uspješno se koristi i danas, no naročiti napredak u smislu minijaturizacije od nje se nije mogao očekivati.

3. Planarna tehnologija

Razvoj današnjih »mikrokrugova« počao je zato sasvim drugim putem. Da bismo ga što bolje opisali vratimo se načas na prvu preparaciju $p-n$ spoja koju je izvršio R. S. Ohl u laboratorijima Bell Telephonea. On je taj spoj dobio za vrijeme izvlačenja monokristala silicija tako da je u talinu p -tipa dodao primjesu (donor) koja ju je naglo prevratila u n -tip (sl. 1a). U monokristalu javila se tako manje ili više oštra granica ili $p-n$ spoj (sl. 1b). Isječak iz kristala koji je sadržavao tu granicu bio je prva »prava« poluvodička dioda (sl. 1c). Ohlov način prepariranja $p-n$ spoja, iako povijesno značajan, sasvim je nestao iz upotrebe. Vrlo je kompliciran i sasvim nepogodan za masovnu proizvodnju. Ubrzo ga je zato zamijenio drugi postupak, tzv. tehnologija legiranja. Tu se na izrezanu pločicu poluvodiča n -tipa stavljalo zrnce akceptorske primjese i sve se zajedno ugrijalo do taljenja



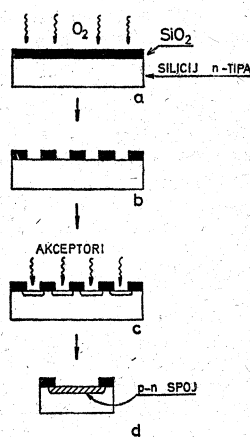
Sl. 1. Pripremanje $p-n$ spoja za vrijeme izvlačenja monokristala



Sl. 2. Pripremanje $p-n$ spoja legiranjem

te primjese. Ona se slila ili legirala s poluvodičem i dala nakon ohlađivanja sloj p -tipa (sl. 2). Prema Ohlovoj metodi to je bio znatan napredak, ali su se i tom postupku stavljale sve ozbiljnije primjedbe. Kako se razvijalo znanje o tranzistoru tako su i zahtjevi bivali sve stroži. Na primjer, jedan od najvažnijih faktora koji određuju svojstva tranzistora jest udaljenost između emitera i kolektora. U tehnici legiranja (a pogotovo u Ohlovoj tehnici taj se faktor mogao vrlo teško kontrolirati. Nikad se nije točno znalo do koje dubine su penetrirali akceptori. Legiranje se kad-tad moralo zamijeniti nekim drugim procesom. Bila je to — difuzija.

Za vrijeme preparacije $p-n$ spoja difuzijom uzorak poluvodiča nalazi se u posudi ispunjenoj plinom koji sadrži primjesne atome. Na pogodnoj temperaturi ti atomi difundiraju u kristal poluvodiča i dopiraju ga. Budući da je difuzija proces koji se može kontrolirati isključivo temperaturom i vremenom i budući da se u njemu ne javlja taljenje ili formiranje nekih međufaza, dubina difuzije ili lokacija $p-n$ spoja također se lako kontrolira. U načelu, takvim se postupkom može prirediti $p-n$ spoj bilo kakvog profila. K svemu tome došlo je i vrlo dragocjeno otkriće da tanki sloj oksida na pločici silicija gotovo sasvim spriječava difuziju primjese iz plinske faze. Efekt je odmah iskorišten za »maskiranje« to jest za razdvajanje onih područja gdje se željela difuzija od onih mjesta gdje difuzija nije bila poželjna. Odjednom se na istoj pločici silicija mogao preparirati vrlo velik broj $p-n$ spojeva. Proces proizvodnje teče ovako: pločica silicija najprije se ugrije i podvrgne djelovanju kisika ili vodene pare. To na njenoj površini stvori tanak sloj silicij dioksida SiO_2 (sl. 3a). Posebnim postupkom koji uključuje jetkanje u jakim kiselinama otvara se zatim u sloju oksida vrlo velik broj prozorčića (sl. 3b). Kad se takva pločica podvrgne procesu difuzije, primjese mogu dopirati silicij samo na onim mjestima gdje nema oksida, dakle kroz pravilno, oblikovane prozorčiće (sl. 3c). Po završenom postupku pločica silicija razreže se na onoliko dijelova koliko je bilo prozorčića pa se odjednom dobiva veliko mnoštvo poluvodičkih dioda. Jednu od njih prikazuje sl. 3d. Nešto složenijom ali u biti istom metodom mogu se proizvoditi i tranzistori. Tehnologija koju smo upravo opisali nazvana je planarnom tehnologijom. Za produkciju poluvodičkih komponenti ona je bila može se reći — revolucionarna. Osim što je povećala mogućnost kontrole geometrijskih faktora povećala je i stabilnost i pouzdanost komponenti. Dobrim dijelom to se ima zahvaliti stabilizaciji površine silicija zaštićenog slojem oksida. Spomenimo usput da je planarna tehnologija gotovo sasvim istisnula germanij kao poluvodič od tehnološkog značenja. Germanij, naime ne stvara oksid takvih svojstava kakvim se odlikuje silicij dioksid.



Sl. 3. Planarna tehnologija

4. Monolitno integriranje

Planarna tehnologija naravno ima i mnogo šire implikacije. Ona nije ponudila samo prednosti koje smo netom opisali. Njezine mogućnosti pomogle su i rađanju ideje od suštinskog značenja za čitav daljnji razvitak poluvodičke elektronike. Ideja se rodila krajem pedesetih i početkom šezdesetih godina i bila je u osnovi vrlo jednostavna: treba na istoj pločici silicija formirati ne samo jednu vrstu elementa, već istovremeno različite elemente (diode, tranzistore, otpornike, kondenzatore) povezane u određeni sklop. Bila je to, dakle, ideja o sasvim novoj vrsti integriranja. Već su prvi pokušaji tog tzv. monolitnog integriranja dali izvanredne rezultate. Ne samo da su sklopovi odjednom postali manji, da im je gustoća pakovanja drastično porasla, već se znatno uvećala i njihova pouzdanost. Diskusiju te veličine već smo najavili u prethodnom tekstu. Evo je: monolitni integrirani krug sastavljen od većeg broja komponenti ima gotovo istu pouzdanost kao i jedan »diskretni« trnizistor. Uzmemo li vrlo skromno da sklop od desetak tranzistora ima SVIK jednak 5 000 000 sati, tada će SVIK računskog stroja iz naših prethodnih primjera porasti na čak 2000 sati. Brojka je vrlo velika, ali ne predstavlja ni izdaleka današnji domet. Što se pak tiče daljnjeg napretka planarne tehnologije, on je tekao začuđujućim tempom. Prvi monolitni krugovi imali su tucet komponenti na pločici silicija sa stranicom 2—3 mm. Druga generacija imala ih je već 3000 na istoj površini. Zatim se spominjala brojka 10 000 dijelova, da bi prognoze za 1985. godinu glasile — milijun.

5. Logički krugovi

Smatramo prikladnim dodati na ovom mjestu još nekoliko rečenica. Poluvodička tehnologija — bolje rečeno onaj njen dio kojim smo se najviše bavili — uspjela je, eto, nagomilati desetke tisuća tranzistora i drugih elektroničkih komponenti na pločicu silicija koja se bez teškoća može smjestiti na vrh prsta. To je svakako velik uspjeh, no čovjek se ipak može zapitati koje je pravo značenje svega toga. Odgovor na to pitanje nećemo naći unutar fizike i tehnologije poluvodiča. Za krajnju upotrebu monolitnih integriranih krugova brinu se, naime, ljudi drugih profesija i struka. Oni bi značenje tih krugova objasnili vjerojatno ovako: to je pribor kojim se mogu na najjeftiniji i najekonomičniji način te uz maksimalnu štednju prostora ostvariti logički krugovi ili procesori visoke kompleksnosti. Procesor, to je sklop u koji ulaze različiti signali ili podaci, bivaju tu obrađeni prema konstruktorovoj zamisli ili pohranjeni za kasniju upotrebu. Nakon obrade podataka on daje različite izvršne signale. Takav sklop, možda je manje poznato, može se ostvariti na različite načine: mehanički, magnetski, pneumatski itd. No, sva ta ostvarenja ne mogu se ni približno usporediti s integriranim krugovima. Jedino s njima moguće je stvoriti — mikroprocesore.

Problem koji obrađuje takav procesor formulira se u terminima posebne algebre koju nazivamo *Booleovom* algebrom (ili logikom).

Varijable u tom matematskom aparatu mogu poprimiti samo dvije vrijednosti (1 ili 0, Da ili Ne) pa je za njega veoma pogodan binarni brojni sustav. Procesor zato nazivamo digitalnim, za razliku od analognih procesora čiji se problemi formuliraju običnom algebrom i koji obrađuju kontinuirane varijable. Digitalni procesori, doduše, moraju za istu operaciju imati mnogo veći broj komponenti nego analogni, ali ih je zato jednostavnije oblikovati i pouzdaniji su. Budući da je glavna karakteristika monolitnih integriranih krugova upravo velik broj komponenti ili visoka gustoća pakovanja, oni su idealni za primjenu u digitalnim procesorima. Rezultati su zaista zapanjujući. U to se uvjerio svatko tko je shvatio mogućnosti novih generacija računskih strojeva.

Literatura

1. G. L. Pearson and W. H. Brattain: History of Semiconductor Research, Proc. I. R. E. **2** (1955) 1794.
2. R. B. Sorkin: Integrated Electronics, Mc Graw-Hill, New York 1970.
3. N. M. Morris: Logic Circuits, Mc Graw-Hill, New York 1971.
4. Z. Ogorelec: Fizika poluvodiča i poluvodička tehnologija u suvremenom obrazovanju, Zbornik savjetovanja o prirodnim znanostima u suvremenom obrazovanju, Zagreb 1979., str. 86.